УДК 621.396

РАЗРАБОТКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ СВЧ ГЕНЕРАТОРОВ В НИИ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ПРИ ТПУ

И.И. Винтизенко, А.Г. Жерлицын, А.И. Рябчиков, Ю.Г. Юшков

Приведены результаты исследований в НИИ ядерной физики при ТПУ приборов СВЧ в области релятивистской электроники. Рассмотрены характеристики и возможности виркатора и релятивистского магнетрона в 10-см диапазоне длин волн. Приведены результаты эксперимента, связанного с временной резонансной компрессией выходных СВЧ импульсов релятивистского магнетрона.

Исследования в области релятивистской СВЧ электроники в НИИ ЯФ при ТПУ начались после создания в институте сильноточного ускорителя электронов "Тонус" в 1972 г. [1, 2]. Были исследованы многие приборы релятивистской электроники, однако в настоящее время основные исследования и разработки связаны с виркатором и релятивистским магнетроном. Данным приборам и посвящена эта статья. Кроме того, приведены результаты экспериментов временной резонансной компрессии СВЧ импульсов на выходе релятивистского магнетрона, позволяющей относительно простыми техническими средствами повысить выходную мощность прибора за счет уменьшения длительности выходных СВЧ импульсов.

1. Теоретические и экспериментальные исследования генераторов СВЧ с виртуальным катодом выявили основные параметры и их зависимости от электрических и геометрических величин установок [3]. В таблице приведены характеристики виркаторов, разработанных в НИИ ЯФ при ТПУ. Была показана возможность генерировать импульсы большой мощности $10^8...10^9$ Вт длительностью $10^{-8}...10^{-6}$ с, в диапазоне частот 3...40 ГГц. Некоторые типы виркаторов не требуют для своей работы фокусирующего магнитного поля. Частота генерируемого излучения может перестраиваться в широких пределах. В триоде с виртуальным катодом частота излучения перестраивается величиной зазора катод-анод, величиной напряжения в зазоре. В

Таблица. *Характеристики и виды виркаторов*

Тип (вид) прибора	Схема	U, МВ	I, кА	t_1, нс	P, ГВт	f_0, ГГц	$t_{СВЧ}$, нс
Планарный триод с виртуальным катодом	ВК, А, К	0,65 0,45	14 20	100 1500	1,1 0,45	2,9 2,8	80 1100
Коаксиальный триод с виртуальным катодом	ВК, К, А	0,6	62	80	0,2	2,9	70
Виркатор на циклотронном резонансе	С, $B_0=1,8\cdot10^3$ Гс, К, А, ВК, $B_0=5,4\cdot10^3$ Гс	1,0 1,0	20 20	80 80	1,5 0,9	3,1 5,4	30 30
Редитрон	С, К, А, ВК	0,8	30	80	0,25	16	50
Турботрон	К, А, ВК	0,4	80	80	0,2	40	40

виркаторе на циклотронном резонансе частота излучения перестраивается величиной внешнего магнитного поля. В виркаторах "редитрон" и "турботрон" перестройка частоты излучения осуществляется изменением плотности пучка электронов.

Использование виркатора с СВЧ компрессором позволяет создать источник мощного когерентного электромагнитного излучения наносекундной длительности с частотной стабильностью $10^{-3}...10^{-4}$ при уровне пиковой мощности $10^8...10^9$ Вт [4].

В настоящее время с целью управления процессом излучения в институте проводятся исследования виркаторов с регулируемой обратной связью и с внешним сигналом [5].

Относительно малые весогабаритные характеристики виркаторов, их простота в конструктивном исполнении, возможное отсутствие дополнительных источников энергии для создания фокусирующих магнитных полей делают перспективным их использование в создании мобильных и автономных источников СВЧ излучения с высоким уровнем импульсной мощности.

В институте созданы экспериментальные стенды источников СВЧ излучения на базе виркаторов с емкостными и индуктивными накопителями энергии. На стендах с емкостными накопителями энергии проводятся работы по созданию мобильных источников СВЧ излучения, работающих в частотно-периодическом режиме, по фокусировке излучения в свободном пространстве, воздействию излучения на различные материалы и объекты. Для этих целей создан безэховый зал 12х8х4 м^3 с коэффициентом отражения (коэффициентом безэховости) - 20 дБ в диапазоне частот 0,6...6 ГГц. На стендах с индуктивными накопителями энергии проводятся работы по созданию автономных источников СВЧ излучения с взрывомагнитными генераторами [6]. На рис. 1 приведен общий вид источника с взрывомагнитным генератором.

В последние годы, как в России, так и рубежом значительно увеличилось число лабораторий, исследующих различные типы виркаторов гигаваттного уровня мощности. Следует ожидать, что интенсивные исследования приведут к созданию генераторов СВЧ с широким спектром потребительских свойств и их практическому использованию.

2. Распространение техники высоких напряжений на приборы СВЧ магнетронного типа оказалось весьма успешным благодаря использованию взрывоэмиссионных катодов. Действительно, экспериментальные исследования релятивистских магнетронов, проводимые с 70-х годов в США и России (ИПФ АН, г. Нижний Новгород и НИИ ЯФ при ТПУ, г. Томск), привели к созданию генераторов гигаваттного уровня мощности в 3-, 10- и 30-см диапазонах длин волн. При этом релятивистские аналоги классических магнетронов в значительной степени сохранили их достоинства: сравнительно высокий КПД, стабильность работы, узкополосность.

В НИИ ЯФ при ТПУ были проведены исследования различных типов магнетронов в области напряжений 0,4...1,0 МВ и токов от 2 до 30 кА при длительности импульса от 50 до 1000 нс. Были исследованы магнетроны с многорезонаторными анодными блоками, состоящие из одинаковых резонаторов, разных резонаторов лопаточного типа и типа щель-отверстие [7, 8]. В 10-см диапазоне длин волн эти магнетроны имеют КПД 20...30 % при гигаваттном уровне мощности в импульсах длительностью 30...100 нс и полосе генерируемых частот 2 %. Вывод СВЧ излучения производится в бок через щель связи в одном из резонаторов. В исследованиях по получению СВЧ импульсов большой длительности (~ 10^{-6} с) были использованы и другие типы магнетронов: обращенный и коаксиальный обращенный магнетроны [9-11]. В этих экспериментах были получены СВЧ импульсы длительностью 500...700 нс с энергией до 250 Дж. Все эти исследования проводились на сильноточных ускорителях, работающих в режиме одиночных импульсов. В то же время, очевидно, что перспективы практического применения релятивистских генераторов связаны с созданием компактных импульсно-периодических СВЧ генераторов.

В институте разработаны линейные индукционные ускорители (ЛИУ), которые благодаря оригинальной компоновочной схеме обладают малыми весогабаритными показателями и выходными параметрами, хорошо соответствующими магнетронным генераторам. Первый удачный эксперимент в 1986 году позволил получить цуг из трех импульсов с частотой следования 160 Гц [12]. Ограничение количества импульсов определялось магнитной системой магнетрона. Для питания магнетрона использовалась секция ЛИУ с многоканальным искровым коммутатором формирующих линий. В последующие годы в институте были разработаны ЛИУ с магнитными коммутаторами формирующих линий, которые позволяют увеличить частоту следования импульсов напряжения до 10^3 Гц. С использованием такого модуля ЛИУ в 1998-2000 гг. были созданы магнетронные генераторы с частотой следования импульсов до 320 Гц (рис. 2) [13].

Магнитное поле магнетрона создается электромагнитом на постоянном токе в виде катушек Гельмгольца, обмотка которых выполнена из полой медной шинки с охлаждающей водой. Анодный блок магнетрона имеет рубашку для водяного охлаждения. Генератор СВЧ может работать в импульсно-периодическом режиме до 80 Гц и пакетно-импульсном до 320 Гц с числом импульсов в пакете до 10^3. Импульсная мощность излучения равнялась 200 МВт при напряжении 360 кВ и полном токе 3 кА, средняя мощность СВЧ - 3 кВт при частоте повторения 320 Гц. Излучение происходило на частоте 2840 МГц в полосе частот <2 %. Общий вес установки 2 т, а геометрические размеры 3,6х1х2 м^3. Нестабильность мощности СВЧ от импульса к импульсу не превышала 12 %.

Одним из путей улучшения характеристик релятивистских магнетронов, таких как увеличение эффективности, улучшение частотной стабильности при повышении мощности генератора является введение связей резонаторов, в том числе и внешних через диссипативную нагрузку. В этом случае используется релятивистский магнетрон с несколькими выводами мощности (или несколько магнетронов, работающих параллельно), связанными антенно-фидерным трактом. Тракт имеет несколько синфазных излучателей, составляя антенную решетку. Реализация подобного когерентного источника направленного излучения с минимальными весогабаритными показателями и энергозатратами является приоритетной для данной области исследований.

3. Мощность излучения СВЧ установок можно увеличить за счет сокращения длительности выходных импульсов методом временной резонансной компрессии. Этот метод длительное время исследуется в НИИ ЯФ при ТПУ. Первые эксперименты были проведены еще в 70-х годах [14]. Принцип действия метода основан на накоплении высокочастотной энергии в волноводных резонаторах с последующим быстрым выводом через интерференционные переключатели с газоразрядной СВЧ коммутацией.

В качестве накопителей энергии обычно используются медные резонаторы на основе регулярных волноводов. Такие резонаторы имеют постоянную времени несколько микросекунд и могут применяться для сжатия микросекундных СВЧ импульсов, получаемых с помощью промышленных генераторов. Нами проведен большой цикл работ [15] по компрессии импульсов излучения на выходе промышленных магнетронов 3-, 10- и 30-см диапазонов. В этих диапазонах достигнуты в отдельных компрессорах коэффициенты усиления 50, 100 и 150 раз, соответственно, при этом минимальная длительность СВЧ импульсов составляла 1...3 нс. В коаксиальной системе компрессии метрового диапазона минимальная длительность формируемых импульсов соответствовала одному периоду высокочастотного поля. Если энергия импульсов источника СВЧ излучения достаточно большая, то можно использовать резонаторы, изготовленные из сверхразмерных волноводов [16] или осуществлять компрессию в нескольких параллельных системах [17]. Для увеличения степени сжатия применялось последовательное включение нескольких компрессоров. В системе двухступенчатой компрессии получены СВЧ импульсы мощностью 1 ГВт при длительности 1 нс, когда питание осуществлялось от магнетрона, имеющего длительность импульсов 3 мкс, мощность 2,5 МВт и частоту повторения 400 Гц [18].

Компрессор, по отношению к источнику питания, является высокодобротной нагрузкой, и поэтому для его питания требуются источники с высокой частотной стабильностью. При возбуждении резонаторов компрессоров от промышленных магнетронов происходит затягивание их частоты и стабилизация работы системы. При реализации компрессии импульсов на выходе релятивистских приборов возможность такой стабилизации не очевидна. Известно, что частотная стабильность релятивистских приборов по сравнению с промышленными невысока. Поэтому, чтобы выяснить принципиальную возможность компрессии на выходе релятивистского магнетрона нами был проведен эксперимент, схема которого показана на рис. 3. В эксперименте использовался релятивистский магнетрон, параметры которого приведены выше [13].

В качестве устройства компрессии использовался прямоугольный волновод 72x34 мм^2, закороченный с двух сторон. Отверстие возбуждения и выходной волновод расположены в середине резонатора в Е- и Н-плоскостях, соответственно. Газоразрядный СВЧ коммутатор установлен на расстоянии четверти длины волны от одного из концов резонатора. Для обеспечения электрической прочности резонатор и выходной тракт заполнялись азотом до давления 7 атм. Согласование магнетрона с резонатором обеспечивалось выбором длины тракта и ферритовым вентилем.

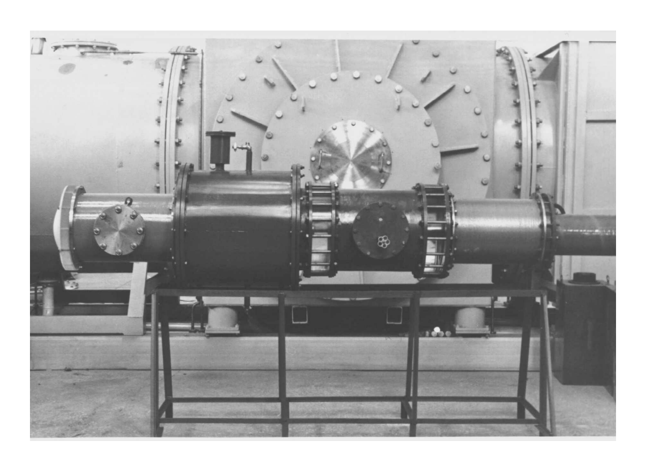


Рис. 1. *Виркатор с взрывомагнитным генератором*

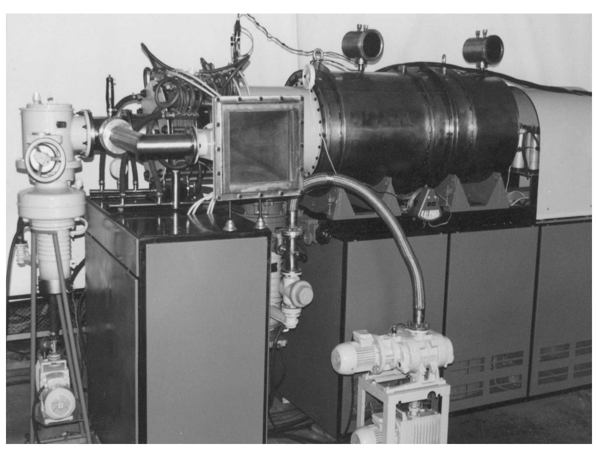


Рис. 2. *Модуль ЛИУ с магнитными коммутаторами*

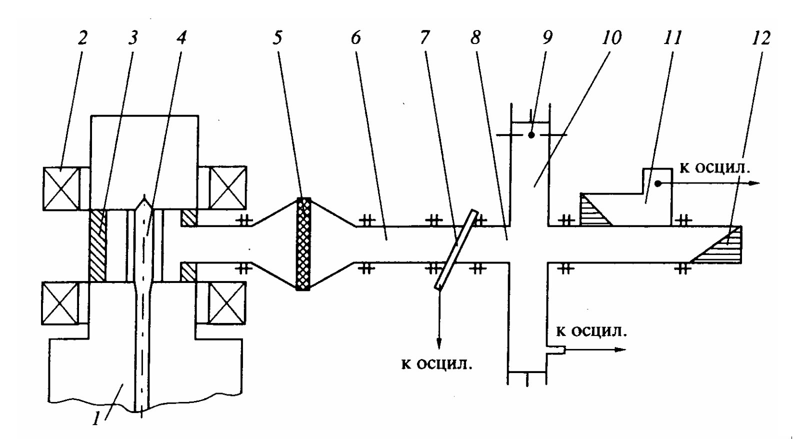


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1) высоковольтный источник; 2) катушки магнита магнетрона; 3) анодный блок магнетрона; 4) взрывоэмиссионный катод магнетрона; 5) диэлектрическое окно; 6) волноводная вставка; 7) направленный ответвитель; 8) отверстие связи; 9) разрядник компрессора; 10) резонатор компрессора; 11) направленный компрессор; 12) согласованная нагрузка

Эксперимент показал, что из-за изменения частоты магнетрона в течение импульса генерации накопление энергии продолжалось только 50 нс. Однако этого было достаточно, чтобы получить на выходе СВЧ импульсы длительностью 5 нс с пиковой мощностью до 1,2 ГВт [19].

В заключение нужно отметить, что резонансные компрессоры в сочетании с промышленными генераторами позволяют создавать относительно недорогие излучательные установки наносекундных СВЧ импульсов в диапазоне длительностей от 1 до 100 нс с пиковой мощностью до 1 ГВт и частотой повторения до нескольких килогерц. Для более эффективного использования компрессоров с релятивистскими генераторами требуется проведение дальнейших исследований по согласованию параметров генераторов и компрессоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Didenko A.N., Zherlitsyn A.G., Zelentsov V.I. et al. Experimental of microwave radiation in 10 sm band of intense relativistic electron beam // Intern. Top. Conf. on Electron Beams Research and Technology. - Albuquerque, New Mexico, 1975. - V. 2. - P. 424-429.
2. Didenko A.N., Fomenko G.P., Krasik Ya.E. et al. Generation of high power RF-pulsen in magnetron and reflex triode system // Proc. of 3rd Inf. Top. Conf. on High Power Electron and Beam. - Novosibirsk, 1979. - V. 2. - P. 683-691.
3. Генерация электромагнитных колебаний в системах с виртуальным катодом / А.Н. Диденко, В.П. Григорьев, А.Г. Жерлицын // Плазменная электроника. Сб. научных трудов. - Киев: Изд-во Наукова думка, 1989. - С. 112-131.
4. Диденко А.Н., Жерлицын А.Г., Мельников Г.В. и др. Формирование мощного когерентного электромагнитного излучения наносекундной длительности в триоде с виртуальным катодом // Доклады АН СССР. - 1989. - Т. 309. - № 5. - С. 1117-1120.
5. Григорьев В. П., Жерлицын А.Г., Коваль Т.В. и др. О возможности изменения частоты излучения внешним сигналом в СВЧ триоде с виртуальным катодом // Письма в ЖТФ. - 1988. - Т. 14, вып. 23. - С. 2164-2168.
6. Азаркевич Е.И., Диденко А.Н., Жерлицын А.Г. и др. Генерация импульсного СВЧ излучения с помощью энергии химических взрывчатых веществ // Доклады АН СССР. - 1991. - Т. 319. - № 2. - С. 352-355.
7. Диденко А.Н., Сулакшин А.С., Фоменко Г.П. и др. Исследование генерации мощных сверхвысокочастотных колебаний с помощью релятивистского магнетрона // Письма в ЖТФ. - 1978. - Т. 4, вып. 1. - С. 10-13.
8. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Черногалова Л.Ф. и др. Экспериментальные исследования разнорезонаторного сильноточного магнетрона // Письма в ЖТФ. - 1983. - Т. 9, вып. 8. - С. 482-485.
9. Диденко А.Н., Сулакшин А.С., Фоменко Г.П. и др. Релятивистский магнетрон с импульсным напряжением микросекундной длительности // Письма в ЖТФ. - 1978. - Т. 4, вып. 14. - С. 823-825.
10. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Черногалова Л.Ф. Генерация СВЧ излучения обращенным релятивистским магнетроном // Письма в ЖТФ. - 1987. - Т. 13, вып. 10. - С. 620-623.
11. Винтизенко И.И., Сулакшин А.С., Фоменко Г.П. и др. Обращенный коаксиальный релятивистский магнетрон 3-см диапазона длин волн // Радиотехника и электроника. - 1990. - Т. 35, вып. 4. - С. 899-901.
12. Васильев В.В., Винтизенко И.И., Диденко А.Н. и др. Релятивистский магнетрон, работающий в режиме цуга импульсов // Письма в ЖТФ. - 1987. - Т. 13, вып. 12. - С. 762-766.
13. Бутаков Л.Д., Винтизенко И.И., Гусельников В.И. и др. Импульсно-периодический релятивистский магнетрон // Письма в ЖТФ. - 2000. - Т. 26, вып. 13. - С. 66-70.

14. Диденко А.Н., Зеленцов В.И., Штейн Ю.Г., Юшков Ю.Г. Генерирование мощных СВЧ импульсов наносекундной длительности // Радиоэлектроника. - 1972. - Т. 17, вып. 7. - С. 1545-1547.

15. Диденко А.Н., Юшков Ю.Г. Мощные СВЧ импульсы наносекундной длительности. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 112 с.

16. Артеменко С.Н., Августинович В.А., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. Вывод энергии из сверхразмерного резонатора через "пакет" интерференционных переключателей с суммированием выходных сигналов // ЖТФ. - 2000. - Т. 7, вып. 11. - С. 105-107.

17. Новиков С.А., Разин С.В., Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. Получение мощного СВЧ излучения при сложении радиосигналов на выходе резонансных формирователей // Письма в ЖТФ. - 1990. - Т. 16, вып. 20. - С. 46-48.

18. Чумерин П.Ю., Юшков Ю.Г. Формирователь гигаваттного наносекундных СВЧ импульсов с применением временной компрессии энергии излучения магнетрона // Приборы и техника эксперимента. - 2000. - № 3. - С. 85-87.

19. Диденко А.Н., Винтизенко И.И., Мащенко А.И. и др. Резонансная компрессия СВЧ импульсов на выходе релятивистского магнетрона // Доклады РАН. - 1999. - Т. 366. - № 5. - С. 619-621.

УДК 621.396